干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于SRTM DEM的祁连山自然保护区地形特征研究

张　坤[1]，　肖　燕[1]，　何振芳[1,2]，　高　敏[1]
（1　聊城大学环境与规划学院，山东 聊城　252000；　2　中国科学院生态环境研究中心，北京　100085）

摘　要： 基于研究区的SRTM DEM模型，应用ArcGIS10.5空间分析模块及Excel、SPSS数据统计分析功能，采用均值变点分析法确定地形起伏度的邻域分析最佳统计单元；提取了研究区高程、地形起伏度、地形坡度、地表粗糙度和地表切割度5个地形因子，以分析研究区的地形特征。结果表明：研究区地形起伏度最佳统计单元为11像元×11像元（0.98 km^2），地形起伏度为0～1 216 m。研究区包含13种地貌类型，87.28%的区域为中海拔，中海拔平原、台地、丘陵为主要地貌类型。走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭和龙首山地平行分布，台地、丘陵穿插其中，地形复杂。研究结果为进一步探索自然保护区的生态保护、开发利用等具体问题提供了基础数据支持。

关 键 词： SRTM DEM；地形特征；均值变点分析；祁连山自然保护区
文章编号：

地貌是地球在内外动力相互作用下于地表表现出来的各种形态，是组成地球表层系统的重要一员，对地球系统的其他方面起着决定性的作用[1-2]。晚新生代以来，印度板块与欧亚大陆的持续挤压碰撞形成了世界上最大最高的高原——青藏高原。高原的隆生对全球环境的分布产生了巨大影响，也对中国构造——地貌的基本轮廓起来决定性的作用[3-5]。祁连山作为青藏高原北部边缘山系，是中国阶梯状地貌轮廓第1、2阶梯的过渡地带，呈NWW—SEE走向，该山系晚新生代到现今的构造活动十分强烈，发育了大量晚第四纪活动逆断裂、走滑断裂以及活动褶皱等，地形复杂[6]。祁连山复杂地貌的形成过程，一直受到众多地质、地貌学家的广泛关注。苏琦等[7]提取了祁连山东段石羊河流域的宏观地形因子，提供了祁连山东段向河西走廊内部挤压扩展的证据。郝明等[8]对青藏高原东北缘区域的运动与变形进行了研究，得出祁连山北缘断裂具有水平挤压和左旋剪切变形。孙然好[9]通过对祁连山北部地区地形因子、流域泥沙资料的研究认为，该区域正处于地貌演化的幼年期阶段。王一舟等[10]利用GIS空间分析工具获得了祁连山洪水坝河流域地形特征，结合地层岩性和冰山作用等因素进行分析研究，为认识和理解祁连山造山带地貌演化及控制因素提供了基础数据和思路。

祁连山地处我国西北内陆干旱半干旱地区，其独特的自然地理环境，在中国乃至世界自然地理环境保护中具有相当重要的地位。1988年经国务院批准设立的甘肃祁连山国家级自然保护区，是祁连山山地生态系统和生物多样性的精华，是40个具有国际意义的保护区之一。保护区位于97°25′～103°46′E，36°43′～39°36′N，发育有现代冰川，有“天然白色水库”之称，是国家水源涵养区，石羊河、黑河、疏勒河3大水系的发源地，养育着超过70×10^4 hm^{2}农田、110×10^4 hm^{2}林地和800×10^4 hm^{2}草场，保护着超过480×10^{4}人民群众的生命财产安全，维系着千百个工矿企业的生产。研究保护区的地形特征，是进一步深入研究保护区地区土地利用、经济发展建设、人口分布、保护区生态发展等具体问题的前提

收稿日期： 2020-01-21；　**修订日期：** 2020-05-16
基金项目： 国家科技基础条件平台建设数据共享服务项目（Y719H71006）；山东省社科规划研究项目（18CKPJ34）；山东省高等学校人文社会科学计划项目（J18RA196）
作者简介： 张坤（1986-），男（汉族），山东济南，硕士研究生，研究方向为GIS应用建模与开发. E-mail: heartha@163.com
通讯作者： 肖燕（1979-），女（汉族），山东聊城，硕士，副教授，研究生导师，主要从事GIS地学应用、建模与数据可视化方面的研究. E-mail: xy790511@163.com

基础。在改善生态环境、促进经济可持续发展、维系西北地区社会稳定、国土安全等方面具有举足轻重的意义[11-13]。

本研究以SRTM DEM数据和1:400 000中国地市行政边界数据为基础数据，借助ArcGIS10.5空间分析功能提取研究区地形因子，采用Excel、SPSS软件对各因子进行数学统计分析，结合自然保护区的文献资料和野外勘察，从区域尺度上对祁连山自然保护区地区的地形特征进行研究分析，为保护区的生态保护及开发利用提供基础数据支持。

1 研究区概况

祁连山是中国西部多条西北—东南走向的平行山脉和宽谷组成的庞大山系，东起乌鞘岭，西止当金山口与阿尔金山相接，东西长约1 000 km，南北宽约300 km，是我国西部地区重要的生态屏障，祁连山阻隔了巴丹吉林、腾格里两大沙漠的南侵，拱卫了青藏高原乃至三江源的生态安全。

祁连山自然保护区地处青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带的祁连山北麓，覆盖走廊南山—冷龙岭及乌鞘岭、龙首山山地。属森林生态系统类型的自然保护区，生态服务功能巨大，被誉为河西走廊"生命线"和"母亲山"[12]。保护区距离海洋较远，深处中国内陆干旱地区，受控于东部季风区、西北干旱区和青藏高原区三大自然区，属大陆性高寒半湿润山地气候，其冬季长而寒冷干燥，夏季短而温凉湿润。保护区内祁连山山地为褶皱山系，东起乌鞘岭，经冷龙岭、走廊南山至玉门，山势西高东低，相对高差千米以上，发育有现代冰川、高山、中山、低山、峡谷、丘陵、盆地、平原等地貌单元。龙首山山地为褶皱断块山，南坡峻峭北坡平缓，发育有低山、中山、盆地、峡谷等地貌，整个保护区内地表径流资源丰富，沟谷众多，河流水系发育良好[14-16]。

祁连山自然保护区涵盖武威市、金昌市、张掖市的凉州、天祝藏族自治县、古浪、永昌、甘州、山丹、民乐、肃南裕固族自治县8县(区)，有自然保护站22个，总面积达2.65×10^4 km^2。其中核心区面积0.50×10^4 km^2，缓冲区面积为0.39×10^4 km^2，实验区面积为1.10×10^4 km^2，外围保护地带面积0.66×10^4 km^2[16]。因保护区部分区域独立分布，为了保证研究区的完整性，本文以覆盖整个祁连山自然保护区的武威、金昌、张掖三市范围作为研究区域(图1)，以期对保护区地区的生态环境及经济建设提供数据支持。

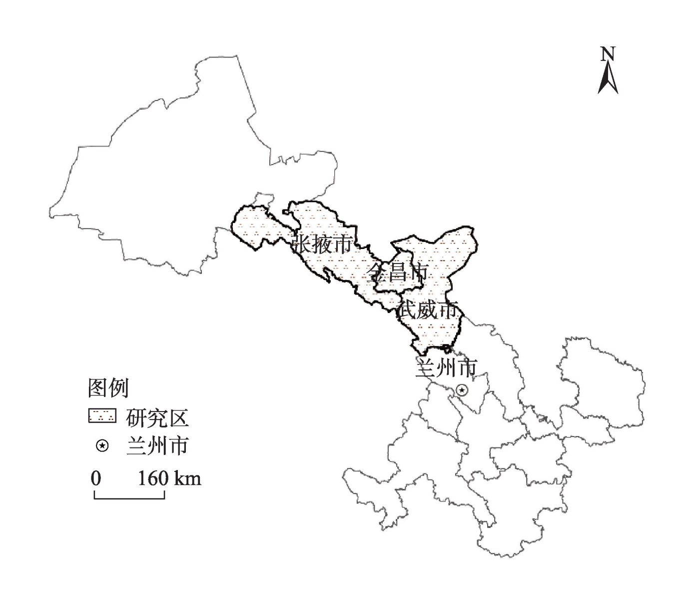


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study region

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文使用的数据包括SRTM DEM数据(90 m)和2015年中国地市行政边界数据(1:4 000 000)。SRTM DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)。SRTM是美国奋进号航天飞机用雷达测图技术获取的60°N ~ 56°S间陆地地表80%面积的数据，经NASA"喷气推进实验室"处理完成，是目前大中尺度区域地形地貌研究采用较多的基础分析数据[17]。中国地市行政边界数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)中国行政区划数据。

2.2 研究方法

2.2.1 地形指标分析 地形因子是最基本的地理要素，是为有效的研究与表达地貌形态特征所设定的具有一定意义的参数或指标。不同的地形因子是对地貌特征在不同层面的表征。一般将地形因子分为宏观和微观两类，宏观地形因子在区域范围内表征地貌特征，微观地形因子则侧重于地面具体点位的特征[18-22]。本文根据研究需要，选择4个宏观因子(高程、地形起伏度、地表切割度和地表粗糙度)和1个微观因子(坡度)。

2.2.1.1　地形起伏度

地形起伏度(R_f)又叫做地势起伏度或相对高程，是指一定区域面积内最高点与最低点的高程差[9,18-20]，计算公式如下：

$$R_{fi} = H_{max} - H_{min} \quad (1)$$

式中：R_{fi} 表示某分析窗口内地形起伏度(m)；H_{max} 表示该窗口内最大高程值(m)；H_{min} 表示该窗口内最小高程值(m)；i 为自然数，表示某分析窗口。

地形起伏度的实质是坡度在宏观区域的延伸，在宏观的区域内反映了地面的起伏特征，是地貌类型划分的定量指标[18]。根据中国陆地1:1 000 000数字地貌分类体系，我国的基本地貌形态依据地形起伏度分为平原(<30 m)、台地(30～75 m)、丘陵(75～200 m)、小起伏山地(200～500 m)、中起伏山地(500～1 000 m)、大起伏山地(1 000～2 500 m)、极大起伏山地(>2 500 m)7种[22]。按照地貌发育的基本理论，一种地貌类型存在一个使最大高差达到相对稳定的最佳分析面积，该面积能够恰到好处的反映出研究区地貌的完整性，并在一定范围内具有较强的代表性[23-24]。确定此最佳分析面积，是提取地形起伏度的关键。

本文使用ArcGIS10.5 Focal Statistics(焦点统计)功能，采用矩形分析窗口，从2×2、3×3、4×4、…、30×30对研究区DEM统计不同矩形窗口下的地形起伏度，利用Excel软件对每个窗口下对应的面积与平均起伏度进行对数拟合，得出拟合曲线 y=52.262ln(x)−84.141，决定系数 R^2 = 0.960 6(图2)拟合程度良好，从曲线变化情况可以看出，曲线开始呈急剧增长，说明随窗口大小增大，平均地势起伏度增长速度明显，当邻域面积超过60×10⁴ m²时，平均地势起伏度变化速度逐渐变缓，曲线上存在由陡变缓的变点，即存在地形起伏度最佳统计单元[25]。

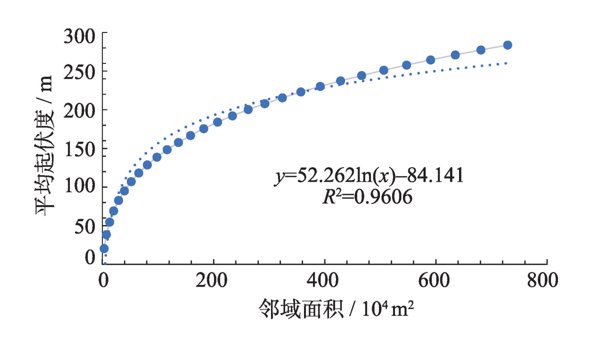


图2　邻域面积与平均地形起伏度关系拟合曲线

Fig. 2　Fitting curve of the relationship between the neighborhood area and relief amplitude

采用基于统计学的均值变点分析法对拟合曲线上由陡变缓的点进行判定[23-25]。方法过程如下：

(1) 计算各个分析窗口下单位面积上的地势大小序列 T (单位地势度)(式(2))。

$$T_i = t_i / s_i \ (i = 2, 3, \cdots, 30) \quad (2)$$

式中：T_i 为分析窗口下的单位地势度；t_i 为分析窗口下的平均起伏度；s_i 为分析窗口下的邻域面积(m^2)；i 为矩形分析窗口。

(2) 对序列 T 取对数 $\ln T$，得到样本序列 X，X 为 $\{x_j, j = 1, 2, 3, \cdots, 29\}$。

(3) 在1)、2)处理的基础上，计算样本序列 X 的算数平均值 $\bar{X}$，计算公式如下：

$$\bar{X} = \sum_{t=j}^{N} \frac{x_t}{N} \quad (3)$$

式中：$\bar{X}$ 为总体样本的算数平均值；N 为总样本个数。

(4) 计算样本序列 X 总的离差平方和 (S)，计算公式如下：

$$S = \sum_{t=j}^{N} (x_t - \bar{X})^2 \quad (4)$$

(5) 计算样本序列的 S_k，计算公式如下：

$$S_k = \sum_{t=1}^{k-1} \left(x_t - \overline{x_{j1}}\right)^2 + \sum_{t=k}^{N} \left(x_t - \overline{x_{j2}}\right)^2 \quad (5)$$

式中：S_k 为两段样本的离差平方和之和。

S_k 值的计算过程如下：令 $k = 2, 3, \cdots, N$，对于每个 k 都将样本 X 分为两部分，即 $x_1, x_2, \cdots, x_{j-1}$ 和 $x_j, x_{j+1}, \cdots, x_N$ 每一段样本的算数平均值 $\overline{x_{j1}}$ 和 $\overline{x_{j2}}$ 及 S_k。

根据统计结果，利用Excel软件做出 S 与 S_k 差值的变化曲线(图3)，得出祁连山自然保护区地形起伏度的最佳分析窗口为11×11，根据DEM的分辨率(90 m)计算得到最佳统计单元面积为0.98 km²。

2.2.1.2　高程

高程即海拔，是地面点到大地水准面的相对高度，根据中国地貌的三级台阶特点，在中国陆地1:1 000 000数字地貌分类体系中，将我国地形的高程分为4级：低海拔(<1 000 m)、中海拔(1 000～3 500 m)、高海拔(3 500～5 000 m)、极高海拔(>5 000 m)[19,26]。研究区位于中国第2、3阶梯的分界处，其最低海拔为1 246 m，最高海拔5 541 m，涵

图3　S 与 S_k 差值变化曲线

Fig. 3　Change curve of the difference value between S and S_k

盖中海拔、高海拔、极高海拔三级地形高程。

2.2.1.3　地表粗糙度和地表切割度

地表切割度(D)是地面上某一点的邻域范围内,平均高程与最小高程的差值,该值能够直观的反应地表被侵蚀切割的情况[21,27]。计算公式如下:

$$D_i = H_{mean} - H_{min} \tag{6}$$

式中:D_i 表示某统计单元内地表某一点的切割深度(m);H_{mean} 表示该统计单元内的平均高程值(m);H_{min} 表示该统计单元内的最小高程值(m);i 为自然数,表示某统计单元。

地表粗糙度(R)是地表单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比,是反映地形起伏变化和侵蚀程度的宏观指标[21,27]。地表单元的粗糙度计算公式如下:

$$R = 1/\cos a \tag{7}$$

式中:R 表示地表粗糙度;a 表示地形坡度(计算时需进行角度与弧度的变换)。

2.2.1.4　地形坡度

坡度(Slope)是地面上某点的切平面与水平地面的夹角,是描述地面倾斜程度的地形因子之一,是对地表单元陡缓程度的直观表达,对于阐明地貌发育阶段和山坡稳定性具有重要意义[26-28]。ArcGIS软件采用与目标像元相邻的8个像元的值确定其水平增量和垂直增量,从而计算目标像元的坡度值。计算公式如下:

$$slope = \arctan\sqrt{slope_{we}^{\,2} + slope_{sn}^{\,2}} \times 180/\pi \tag{8}$$

式中:$slope$ 表示地形坡度;$slope_{we}$ 表示目标像元在水平方向上的增量;$slope_{sn}$ 表示目标像元在垂直方向上的增量。

依据国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会关于地貌详图应用的坡地分类标准,将坡度分为7个等级:平原(0°~2°),缓斜坡(>2°~5°),斜坡(>5°~15°),陡坡(>15°~25°),急坡(>25°~35°),急陡坡(>35°~55°),垂直坡(>55°~90°)[28-29]。本文采用上述7个坡度等级对研究区坡度进行划分并统计。

2.2.2　GIS空间分析方法　GIS空间分析指从空间数据中获取有关地理对象的空间位置、分布、形态、形成和演变等隐含信息并进行分析。本文主要基于ArcGIS平台中为栅格(基于像元的)数据和要素(矢量)数据提供的类型丰富的空间分析和建模工具进行各种派生数据的提取、计算和可视化。主要的空间分析方法集中在空间分析(Spatial Analysis)扩展模块上实现。邻域分析的焦点统计(Focal Statistics)工具对指定邻域上的栅格计算其统计数据。本文借助Focal Statistics工具,结合统计学的均值变点分析法,确定了研究区地形起伏度提取的最佳统计单元并提取了地形起伏度因子,地表切割度因子也是基于此工具计算提取。表面分析的坡度(Slope)工具用于确定各像元中的坡度,本文基于SRTM DEM数据提取研究区的坡度因子。重分类(Reclassify)工具可对栅格中的值进行重新分类(或更改),栅格计算器(Raster Calculator)工具使用地图代数表达式执行栅格分析。本文联合应用Reclassify和Raster Calculator工具对地形因子进行分类、计算。区域分析中的以表格显示分区统计(Zonal Statistics As Table)工具可汇总某个数据集区域内的栅格数据值并将结果记录到表中。本文采用该工具对研究区各坡度等级下的地表粗糙度和地表切割度进行汇总,进一步验证研究区内各地形因子的空间分布情况。

3　结果与分析

3.1　研究区地貌类型

研究区位于中国大陆第1、2阶梯过渡处,最低海拔为1 246 m,最高海拔5 541 m,涵盖中海拔、高海拔、极高海拔3个等级。地表起伏度从0~1 216 m,根据地表高程和地表起伏度,可将研究区划分为15种基本地貌类型。鉴于大起伏中山、大起伏高山所占面积均在0.01%以下,难以在地貌分布图标识,遂对其进行归并处理,将大起伏中山与中起伏中山归为中大起伏中山,大起伏高山与中起伏高山归为中大起伏高山。极高海拔地区所占比例仅0.06%,但由于其是现代冰川发育地,且集中分布在研究区西

部，能够在地貌图上进行标识。综上所述，最终将研究区基本地貌类型划分为13种(图4)并对其面积百分比进行统计(表1)。

从表中可以看出研究区87.28%位于中海拔区域，其中中海拔平原占据42.03%，为主要地貌类型，主要位于河西走廊区域内的走廊盆地、各山脉间的山间盆地、堆积平原、山前平原等地，分布相对集中。中海拔丘陵与中海拔台地占据29.52%，且二者面积相当，中海拔丘陵主要分布于走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭的北坡，龙首山的南北坡以及一些独立山丘，中海拔台地则主要分布在中海拔丘陵与中海拔平原的过渡地带。而小起伏中山则

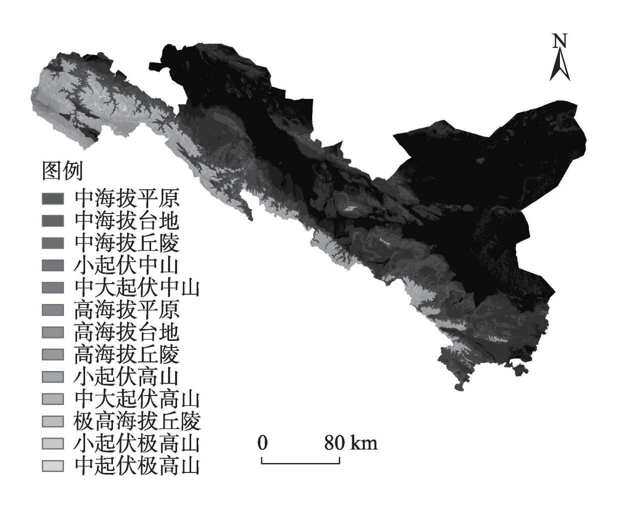


图4 研究区地貌类型专题图

Fig. 4 Thematic map of geomorphologic types

表1 各地貌类型面积统计表

Tab. 1 Area of different geomorphologic types

海拔	比例/%	地貌类型	面积/km²	比例/%
中海拔	87.281 2	中海拔平原	33 099.54	42.030 6
		中海拔台地	11 742.40	14.910 8
		中海拔丘陵	11 504.05	14.608 1
		小起伏中山	10 543.75	13.388 7
		中大起伏中山	1 845.16	2.343 0
高海拔	12.656 0	高海拔平原	78.60	0.099 8
		高海拔台地	414.69	0.526 6
		高海拔丘陵	880.83	1.118 5
		小起伏高山	5 882.35	7.469 5
		中大起伏高山	2 710.28	3.441 6
极高海拔	0.062 8	极高海拔丘陵	0.06	0.000 1
		小起伏极高山	34.21	0.043 4
		中起伏极高山	15.20	0.019 3

广泛分布于各山脉的边缘地带及山间褶皱带，以走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭较为集中，占据研究区的13.39%。中大起伏中山仅占2.34%，主要分布于走廊南山、冷龙岭西段的山脊和近山顶处。高海拔区域占研究区的12.66%，以小起伏高山为主要地貌单元，占据7.47%。主要分布于走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭近山顶区域及山间褶皱断裂处。中大起伏高山占据3.44%，主要分布于山脉山顶处、山间褶皱断裂处，河谷两侧，以走廊南山较为集中。研究区内极高海拔区域面积仅49.47 km²，分布于走廊南山祁连峰附近，以小起伏、中起伏极高山为主要地貌，发育有现代冰川，是重要的水源储备区。

表2 坡度分级统计

Tab. 2 Classified statistics of slope

坡度 / °	0 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 35	35 ~ 55	55 ~ 69
百分比 / %	45.56	15.31	16.65	10.98	8.75	2.74	0.01
累计百分比 / %	45.56	60.87	77.52	88.50	97.25	99.99	100.00

3.2 研究区地形特征

由表2、表3和研究区专题图(图5a坡度分级专题图、5b地表切割度专题图、5c地表粗糙度专题图)可以看出，研究区内主要坡度类型集中在0°~25°范围内，占研究区总面积的88.50%。其中15°以下区域面积占研究区总面积的77.52%，且地表粗糙度小于1.02，地表切割度低于84.93 m。主要分布于研究区内的河西走廊、山间盆地、河西平原、河流两侧以及各山脉的边缘地带，在研究区东部中海拔区域相

表3 不同坡度等级下地表粗糙度和切割度

Tab. 3 Surface roughness and incision under different slope grades

坡度 / °	地表粗糙度均值	地表切割度均值 / m
0 ~ 2	1.00	8.97
2 ~ 5	1.00	29.94
5 ~ 15	1.02	84.93
15 ~ 25	1.06	151.84
25 ~ 35	1.15	220.30
35 ~ 55	1.28	275.06
55 ~ 69	1.91	343.68

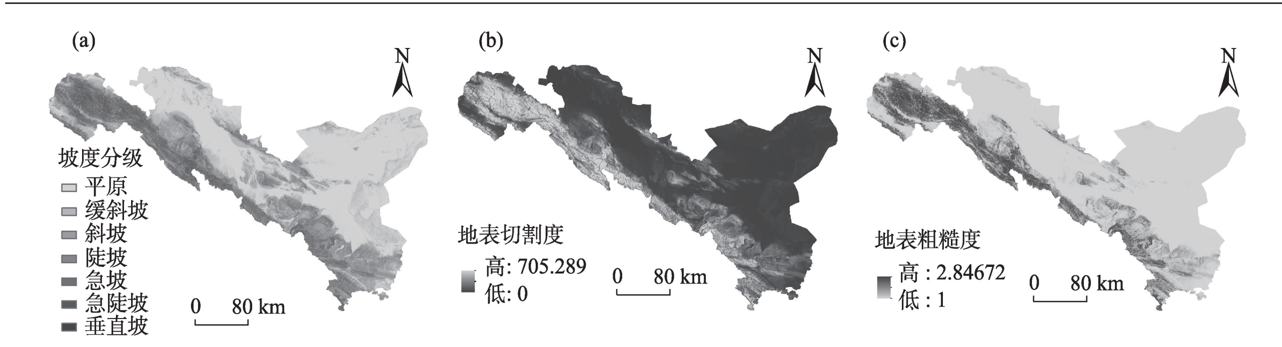


图5 坡度分级、地表切割度、地表粗糙度专题图

Fig. 5 Thematic map of slope grades, surface incision and surface roughness

对集中，与中海拔平原、台地的分布相符。15°～25°的陡坡广泛分布于走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭、龙首山等山脉的山谷处，其地表粗糙度为1.06，地表切割度在151.84 m，地表侵蚀切割程度较重。坡度25°以上的区域占总面积的11.50%，其地表粗糙度大于1.15，地表切割度大于220.30 m，地形起伏变化明显，地表切割程度严重，主要分布于各山脉山脊处、山间褶皱地带及河流切割严重的区域。

4 结论

祁连山自然保护区地区复杂的地理环境，在中国自然地理环境保护中具有重要地位。本文根据研究区的基本地形特征，将研究区划分为13种地貌类型，并制作了研究区地貌类型、坡度、地表粗糙度、地表切割度专题图，并借助Excel、SPSS对地形因子进行了统计分析。结合专题图及统计分析表，分析了研究区的地形特征，得到以下结论：

（1）祁连山自然保护区地区总体位于我国第2阶梯，地貌类型复杂。以SRTM DEM为基础数据，其地形起伏度最佳统计单元为11×11（0.98 km^2）。研究区87.28%为中海拔区域，以中海拔平原、台地、丘陵为主要地貌类型。各地形因子呈带状分布，符合研究区走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭和龙首山山地平行分布的状况。

（2）在本文基础数据的基础上，下一步结合研究区其他数据（土壤、土地利用类型等），在土地利用、开发建设、生态环境保护等具体方面予以深入研究。

参考文献(References)

[1] 张会平, 张培震, 郑德文, 等. 祁连山构造地貌特征: 青藏高原东北缘晚新生代构造变形和地貌演化过程的启示[J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 907-920. [ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, et al. Tectonic geomorphology of the Qilian Shan: Insights into the late Cenozoic landscape evolution and deformation in the north eastern Tibetan plateau[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(5): 907-920.]

[2] 顾延生, 张旺生, 朱云海, 等. 祁连山东南缘基于RGMAP的数字化地貌研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2003, 28(4): 395-400. [GU Yansheng, ZHANG Wangsheng, ZHU Yunhai, et al. Preliminary digital geomorphologic research on southeastern margin of Qilian Mountains Based on RGMAP[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(4): 395-400.]

[3] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 青藏高原隆升对中国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 698-714. [GE Xiaohong, LIU Junlai, REN Shoumai, et al. Tectonic uplift of the Tibetan Plateau: Impacts on the formation of landforms, climate changes and ancient human migration in China [J]. Geology in China, 2014, 41(3): 698-714.]

[4] FIELDING E, ISACKS B, BARAZANGI M, et al. How flat is Tibet? [J]. Geology, 1994, 22(2): 163.

[5] LIU Z J, TAPPONNIER P, GAUDEMER Y, et al. Quantifying landscape differences across the Tibetan Plateau: Implications for topographic relief evolution[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(F4).

[6] 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 祁连山—河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 560-581. [SU Qi, YUAN Daoyang, XIE Hong. Geomorphic features of the Heihe River drainage basin in western Qilian Shan-Hexi corridor and its tectonic implications[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(3): 560-581.]

[7] 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 祁连山东段石羊河流域及邻区地貌特征及其构造意义[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 7-20. [SU Qi, YUAN Daoyang, XIE Hong. Geomorphic features of the Shiyang River Drainage Basin and adjacent area in eastern Qilian Mountains and its insight into tectonic implications[J]. Geological Review, 2017, 63(1): 7-20.]

[8] 郝明, 秦姗兰, 李煜航, 等. 青藏高原东北缘近期地壳水平运动

研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(3): 99−103. [HAO Ming, QIN Shanlan, LI Yuhang, et al. Recent horizontal velocity field of northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(3): 99−103.]

[9] 孙然好. 祁连山北部地区侵蚀速率与地貌演化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005. [SUN Ranhao. A study on erosion rate and geomorphologic evolution of northern Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005.]

[10] 王一舟, 张会平, 俞晶星, 等. 祁连山洪水坝河流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 737−745. [WANG Yizhou, ZHANG Huiping, YU Jingxing, et al. Geomorphic features of the Hongshuiba River drainage basin in Qilianshan Mountain and its insight into tectonic implications[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(4): 737−745.]

[11] 邱丽莎, 何毅, 张立峰, 等. 祁连山MODIS LST时空变化特征及影响因素分析[J/OL]. 干旱区地理, http: //kns. cnki. net/kcms/detail/65.1103.x.20200427.1320.015.html. [QIU Lisha, HE Yi, ZHANG Lifeng, et al. The Spatiotemporal variation characteristics and Influence factors of MODIS LST in Qilian Mountan[J/OL]. Arid Land Geography, http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20200427.1320.015.html.]

[12] 梁鹏斌, 李忠勤, 张慧. 2001—2017年祁连山积雪面积时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1) : 56−66. [LIANG Pengbin, LI Zhongqin, ZHANG Hui. Temporal-spatial variation characteristics of snow cover in Qilian Mountains from 2001 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 56−66.]

[13] 马兴刚, 贾文雄, 丁丹, 等. 祁连山东部大气降水$\delta^{17}O$变化特征及水汽输送[J] . 干旱区地理, 2019, 42(3): 517−525. [MA Xinggang, JIA Wenxiong, DING Dan, et al. Variation characteristics of $\delta^{17}O$ in precipitation and moisture transports in eastern Qilian Mountain[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 517−525.]

[14] 孙然好, 潘保田, 王义祥. 祁连山北麓地貌信息熵与山体演化阶段分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 88−93. [SUN Ranhao, PAN Baotian, WANG Yixiang. Analysis on the geomorphic information entropies and the evolution of the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1): 88−93.]

[15] 郭生祥, 汪有奎, 汪杰, 等. 甘肃祁连山国家级自然保护区功能区区划研究[J]. 林业科技通讯, 2015, (4): 67−70. [GUO Shengxiang, WANG Youkui, WANG Jie, et al. Study on functional area division of Qilian Mountain National Nature Reserve in Gansu[J]. Forest Science and Technology, 2015, (4): 67−70.]

[16] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J] . 干旱区研究, 2020, 37(1): 150−159. [CHEN Tongyao, JIA Yanfeng, WANG Jianan, et al. Current situation and function of soil conservation in National Nature Reserves in the Qilian Mountains based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 150−159.]

[17] 张朝忙, 刘庆生, 刘高焕, 等. SRTM 3与ASTER GDEM数据处理及应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 29−34. [ZHANG Chaomang, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. Data processing and application progress of SRTM3 and ASTER GDEM [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(5): 29−34.]

[18] 韩海辉. 基于SRTM-DEM的青藏高原地貌特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2009. [HAN Haihui. Analysis of geomorphological features of the Tibetan Plateau based on SRTM-DEM[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.]

[19] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707−724. [ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1∶1 000 000 in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(6): 707−724.]

[20] 王耕, 李素娟, 张兴国. 基于DEM的淮河源地貌形态类型划分[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 292−296. [WANG Geng, LI Sujuan, ZHANG Xingguo. Classification of geomorphic forms of Huaihe River Source based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 292−296.]

[21] 唐飞, 陈曦, 程维明, 等. 基于DEM的准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(3): 388−392. [TANG Fei, CHEN Xi, CHENG Weiming, et al. Relief of amplitude in Junggar Basin and peripheral northwest mountains[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(3): 388−392.]

[22] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535−543. [LI Bingyuan, PAN Baotian, HAN Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 535−543.]

[23] 韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度——以青藏高原为例[J]. 地理科学, 2012, 32(1): 101−104. [HAN Haihui, GAO Ting, Yi Huan, et al. Extraction of relief amplitude based on change point method: A case study on the Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 101−104.]

[24] 陈学兄, 张小军, 常庆瑞. 陕西省地形起伏度最佳计算单元研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 265−270, 370. [CHEN Xuexiong, ZHANG Xiaojun, CHANG Qingrui. A study on optimal statistical unit for relief amplitude of land surface in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 265−270, 370.]

[25] 黄小羽. 基于ASTER GDEM地形起伏度最佳分析窗口研究[J]. 城市地理, 2016, (8): 78−79. [HUANG Xiaoyu. Research on the best analysis window of terrain relief based on ASTER GDEM[J]. Cultural Geography, 2016, (8): 78−79.]

[26] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305−1325. [TANG Guoan. Progress of digital elevation model and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica sinica, 2014, 69(9): 1305−1325.]

[27] 汤国安, 那嘉明, 程维明. 我国区域地貌数字地形分析研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1570−1591. [TANG Guoan, NA Jiaming, CHENG Weiming. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China[J]. Acta Geodaetica et Cartographi-

ca Sinica, 2017, 46(10): 1570-1591.]

[28] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. 水土保持通报, 1987, (3): 59-65. [LIU Yuanbao, TANG Keli. On classification of slope steepness at home and abroad and its composition in Wangdong experiment area of Changwu County Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1987, (3): 59-65]

[29] 汤国安, 宋佳. 基于DEM坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20, (2): 157-160, 192. [TANG Guo-an, SONG Jia. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20, (2): 157-160, 192.]

Topography features of Qilian Mountains nature reserve based on SRTM DEM

ZHANG Kun[1], XIAO Yan[1], HE Zhen-fang[1,2], GAO Min[1]

(1 *School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng* 252000, *Shandong China;* 2 *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*)

Abstract: Landforms refer to the various forms of the earth that appear on the surface under the interaction of internal and external dynamics. It is an important member of the Earth's surface system and plays a decisive role in other aspects of the Earth system. Qilian Mountains, which is located in the arid and semi-arid area of northwest China, exhibits unique natural geographical environment, which has great effects on the environmental protection of the natural geography in China and even in the world. This paper focused on analyzing the geomorphological features of Qilian Mountains nature reserve. In this paper, space analysis function of ArcGIS 10.5, statistical analysis function of Excel and SPSS were used to analyze SRTM DEM data of the study area. The optimal analysis window of relief amplitude was determined by the mean-variation analysis. Topographic factors such as elevation, relief amplitude, slope, surface incision, and surface roughness were extracted by Space Analysis and Raster Calculator function of ArcGIS 10.5. According to relevant standards, the five topographic factors were classified and processed by Reclassify and Zonal Statistics as a Table function of ArcGIS 10.5. Finally, the geomorphological features of Qilian Mountains nature reserve were analyzed. Results showed that the optimal analysis window of relief amplitude in the research area was 11×11 (0.98 km^2), and the relief amplitude is 0-1 216 m. Based on the elevation and relief amplitude, the geomorphological features of the research area were divided into 13 categories. 87.28% of the study area is mid-altitude, while others consist of the middle-altitude plains, terraces, and hills as the main types of landforms. Zoulangnanshan, Lenglongling, Wushaoling, and Longshoushan are distributed in parallel with a complex terrain and with interspersed terraces and hills. These conclusions will provide a theoretical basis for further study on specific issues such as ecological protection, development, and utilization in this area.

Key words: SRTM DEM; topography characteristics; mean-variation analysis; Qilian Mountains nature reserve